

Rezultati

Študijska priloga DELA, glasila KPI za slovensko narodno manjšino. TRST, 5. aprila 1989, št. 6

Sinhrotronsko sevanje

F. Cvelbar

Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, VTOZD fizika Fakultete za naravoslovje in tehnologijo in Institut «J. Stefan».

Povzetek

V članku so poljudno prikazane fizikalne osnove Izvira sinhrotronskega sevanja, katerega gradnjo načrtujejo v Trstu.

Uvod

V Trstu že dalj časa razpravljajo o gradnji izvira sinhrotronskega sevanja. Da bi ob političnih debatah v zvezi s tem čim več ljudi poznalo njegove fizikalne osnove, naj pripomore tudi tale poljudni zapis. V njem sinhrotronsko sevanje primerjam z rentgenskim sevanjem, opišem pospeševalni sistem za elektrone (linearni pospeševalnik, sinhrotron in shranjevalni obroč) in prikažem, kako pride do sinhrotronskega sevanja v odklonskem magnetu, v valovalniku in vi-jugalniku. Nekaj povem tudi o uporabi sinhrotronskega sevanja in opišem zaščito pred sevanjem pospeševalnega sistema.

Sinhrotronsko sevanje

Sinhrotronsko sevanje je elektromagnetno sevanje v območju infrardeče, vidne, ultravijolične in celo rentgenske svetlobe, ki je usmerjeno v zelo ozek pramen. Tržaški izvir bo seval predvsem v območju rentgenske in ultravijolične svetlobe.

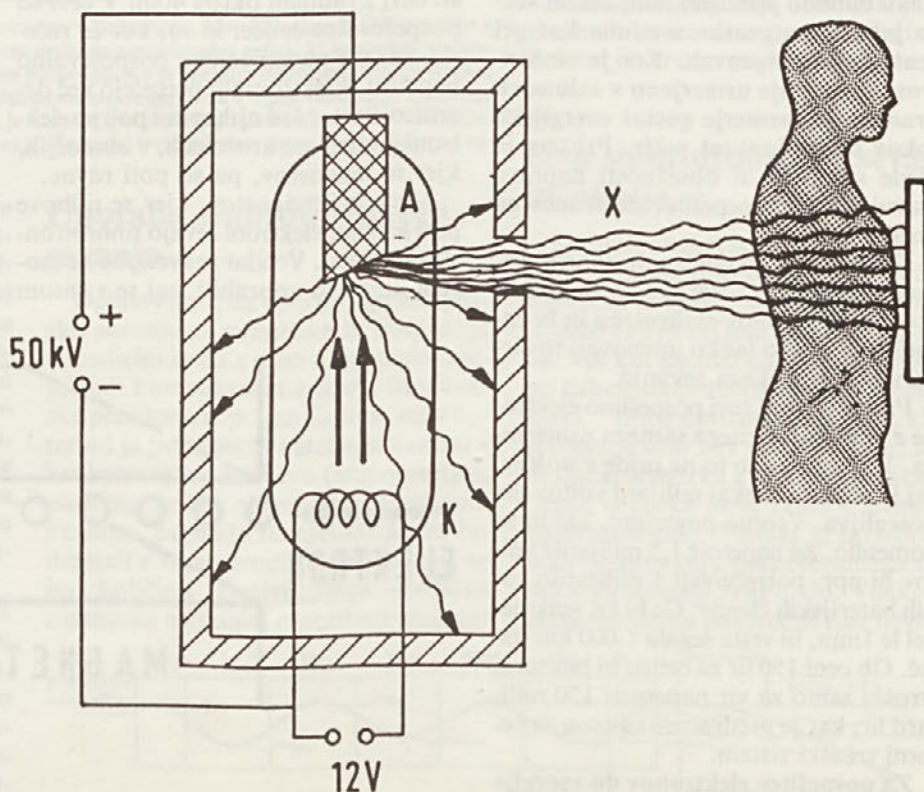
Do nedavnega je sinhrotronsko sevanje pomenilo le nadlego pri velikih pospeševalnikih elektronov — **sinhrotronih** — (od tod tudi ime), v zadnjem času pa postaja nepogrešljivo orodje pri modernih raziskavah n.pr. strukture molekul, trdne snovi, kemijskih reakcij, bioloških procesov itd.

Izvir sinhrotronskega sevanja ima nekaj skupnih fizikalnih osnov z rentgenskim aparatom, zato si najprej oglejmo, kako deluje ta naprava.

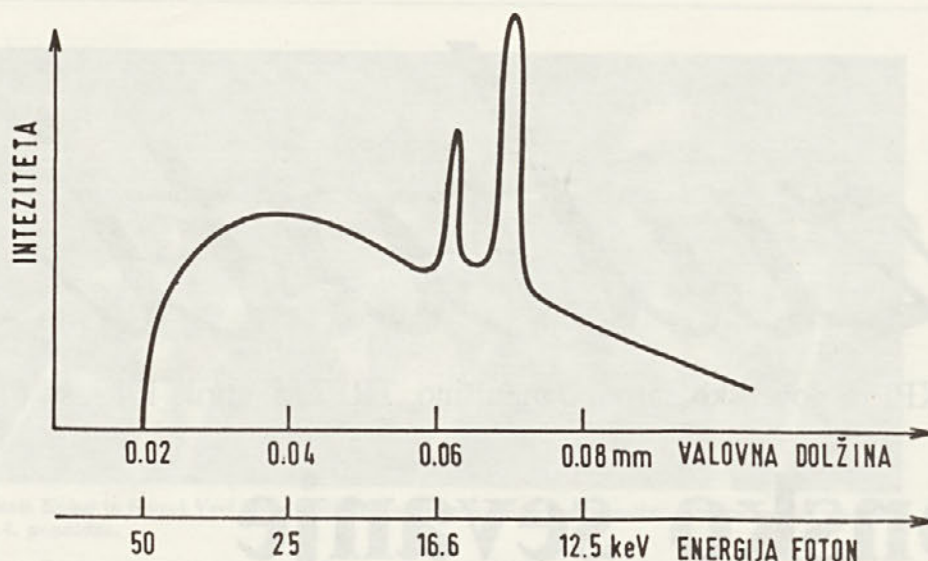
Na kratko lahko rečemo, da je sevanje X iz rentgenske cevi «cviljenje zavor» in «cviljenje gum», ko se elektronu v snovi na hitro spremeni hitrost ali smer gibanja. Zato ga imenujejo tudi **zavorno sevanje**. Elektron seva žarek X, ko zaradi električne sile **spremeni hitrost in/ali smer gibanja** v polju jedra. V rentgenski napravi moramo torej imeti izvir elektronov, napetost za njihovo pospešitev ter snov, v kateri se elektron zavre in seva (sl. 1).

Elektroni so sestavni deli atomov snovi. Krožijo okrog atomskega jedra. V kovinah se nekateri elektroni skoraj prosto gibljejo. Iz razžarjene kovine izhlapevajo podobno kot molekule vodne pare iz vrele vode. Če n.pr. razžarjeno žico obdaja zrak, se elektroni obešajo na okoliške atome. V vakuumu pa jih n.pr. lahko usmerimo na pozitivno elektrodo-anodo.

V rentgenski cevi elektrone iz vroče žice pritegne pozitivno naelektrena elektroda, ki ji pravimo anoda. Pri pospeševalni napetosti n.pr. 40.000 V (40kV) imajo ob anodi kinetično energijo 40keV, kar je $40.1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J}$. V anodi se večina elektronov zaustavlja počasi. Nekateri, takih je okrog 1%, se dovolj približajo atomskim jedrom, da jim močno zakrivijo pot. Pri tem elektroni sevajo žarke X. Energija se širi v prostor v energijskih paketih-fotonih. Njihova največja energija je enaka kinetični energiji elektronov ob anodi (glej sl.2). Čim večja je energija fotonov, tem trši (prodornejši) pravimo, da so rentgenski žarki in tem krajša je njihova valovna dolžina (primerjaj na sl.2 skalo za energijo fotonov s skalo za valovno dolžino, ki ustreza posameznim energijam). Rentgenski aparat seva fotone približno enakomerno v vseh smereh. Seveda



Sl.1. Rentgenski aparat. Žarki X so v smeri odprtine v ohišju narisani bolj gosto. V resnici so približno enako razporejeni v vseh naznačenih smereh.



Sl.2. Porazdelitev rentgenske svetlobe po valovnih dolžinah oziroma po energijah fotonov. Razlaga za nastanek rentgenske svetlobe v tekstu ne velja za del pod vrhovoma.

spustijo skozi odprtino v ohišju samo tisti del sevanja, ki služi za preiskave.

Rentgenska naprava je v bistvu vsak televizor, le pospeševalna napetost je nekoliko nižja kot pri rentgenskem aparatu. Poleg tega je stekleni zaslon, na katerem se elektroni zaustavljajo, narejen iz lahke snovi (silicija in kisika). V njih je verjetnost za nastanek rentgenskega sevanja veliko manjša kot v težkih kovinah, ki jih navadno uporabljajo v rentgenskih napravah. Nezaželeni žarki X, ki pa le nastanejo, se absorbirajo v debeltem steklenem zaslonu.

Rentgenska naprava v osnovnih potezah spominja na izvir sinhrotronskega sevanja. Vendar v tem primeru pospešimo elektrone na energijo nekaj milijard eV, t.j. nekaj giga elektronskih voltov, (GeV), kar je stotisočkrat več kot pri rentgenu, smer gibanja pa jim spremenimo v magnetnem polju (sl.3). Tako dobimo približno milijonkrat večjo jakost rentgenske svetlobe kot pri rentgenskih napravah. Ker je sinhrotronsko sevanje usmerjeno v zelo ozek pramen, je razmerje gostot energijskih tokov še milijonkrat večje. Pri tem je glede stroškov in obsežnosti naprave glavni problem pospešitev elektronov na visoko energijo.

Glavni sestavni del izvira sinhrotronskega sevanja je torej sistem za pospeševanje elektronov-sinhrotron in bi zaradi tega celoto lahko imenovali tovarna sinhrotronskega sevanja.

Pri rentgenski cevi pospešimo elektrone z napetostjo enega samega usmernika. V sinhrotronu to ne pride v poštev, saj je napetost nekaj milijard voltov nedosegljiva. Vseeno pogledimo, kaj bi to pomenilo. Za napetost 1,5 milijarde voltov bi npr. potrebovali 1 milijardo suhih baterijskih členov. Če bi bil vsak debel le 1mm, bi vrsta segala 1.000 km daleč. Ob ceni 150 lir za celico bi bili torej stroški samo za vir napetosti 150 milijard lir, kar je predračunska cena za celotni tržaški sistem.

Za pospešitev elektronov do energije nekaj GeV (v Trstu predvidevajo energijo okrog 2 GeV) preostane samo me-

toda, pri kateri elektrone večkrat pospešimo z isto izmenično napetostjo. Tako pospešijo delce v linearnem pospeševalniku (LINAC) in v različnih krožnih pospeševalnikih.

V linearnem pospeševalniku (sl.4) n.pr. poskrbijo, da se elektroni pospešijo v presledkih med zaporedjem cilindričnih elektrod, ki so vezane na izmenično napetost. Dolžino cevi in frekenco izberejo tako, da se v času pozitivne napetosti elektroni pospešijo, v času negativne nepetosti, ki bi elektrone zavirala, pa se le-ti gibljejo znotraj cevi, kamor električno polje ne seže. Tak linearni pospeševalnik bo pri tržaškem centru pospeševal elektrone do energije 0.2 GeV.

Za nadaljnje pospeševanje gruč elektronske nato vbrizgajo v sinhrotron, (sl.5,6) t.j. pospeševalnik, v katerem jih z magneti prisilijo v gibanje po obročasti cevi z radijem okrog 40m. V cevi so pospeševalne celice, ki so, kot že rečeno, vezane na izmenično pospeševalno napetost. Elektroni jih pretečejo več desetstisočkrat. Med njihovimi poli se elektroni gibljejo po krožnicah, v območjih, kjer ni magnetov, pa so poti ravne.

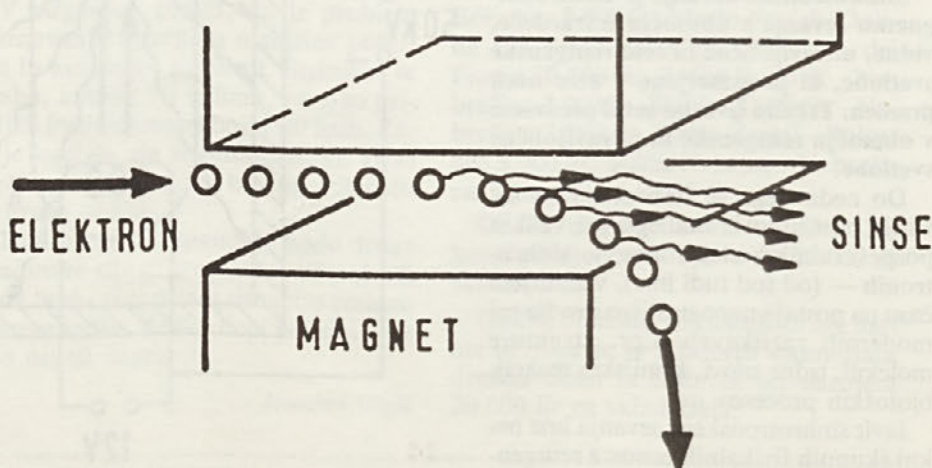
Med poli magnetov, kjer se njihove poti krivijo, elektroni sevajo sinhrotronsko svetlobo. Vendar te svetlobe ne morejo koristno uporabiti, saj se s časom

spreminja energija elektronov in tudi gostota magnetnega polja. Valovna dolžina in jakost sinhrotronskega sevanja sta namreč odvisni od obeh teh količin.

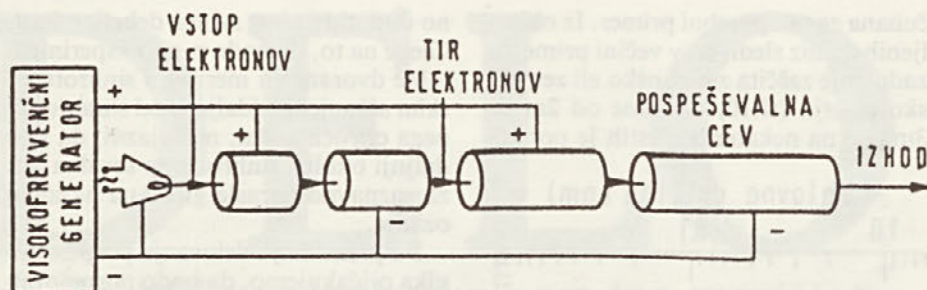
Za uporaben izvir sinhrotronskega sevanja torej potrebujemo hitre elektrone konstantne energije. V ta namen vbrizgajo gruč elektronske v shranjevalni obroč. (Nekateri ga imenujejo tudi nakopičevalnik, saj v njem «kopičijo» elektrone). Shranjevalni obroč je v bistvu enak sinhrotronu, le da v njegovih pospeševalnih celicah (na sl.5 je narisana le ena) dodajajo elektronom le toliko energije, kolikor jo izgubijo zaradi sinhrotronskega sevanja na svojem obhodu obroča. Magneti shranjevalnega obroča so torej že uporabni viri sinhrotronskega sevanja. Pri tržaškem obroču bo takih izvirov okrog 50. Sevali bodo v tankih pramenih, katerih premer se bo šele na razdalji 20m razširil na 2cm.

Vendar raziskovalci niso zadovoljni samo s temi izviri. Želijo še večjo svetlobno jakost, krajše valovne dolžine in včasih celo eno samo valovno dolžino. To dosežejo tako, da na ravni odsekih poti elektronov vstavijo skupek zaporednih magnetov (Sl.7), katerih število in jakost izbirajo po želji, seveda znotraj tehničnih možnosti. Magnetni polji sosednjih magnetov imata nasprotno smer in torej krivita elektronske poti vsak po svoje. Vsi magneti skupaj pa prisilijo elektrone v «slalomske vožnje».

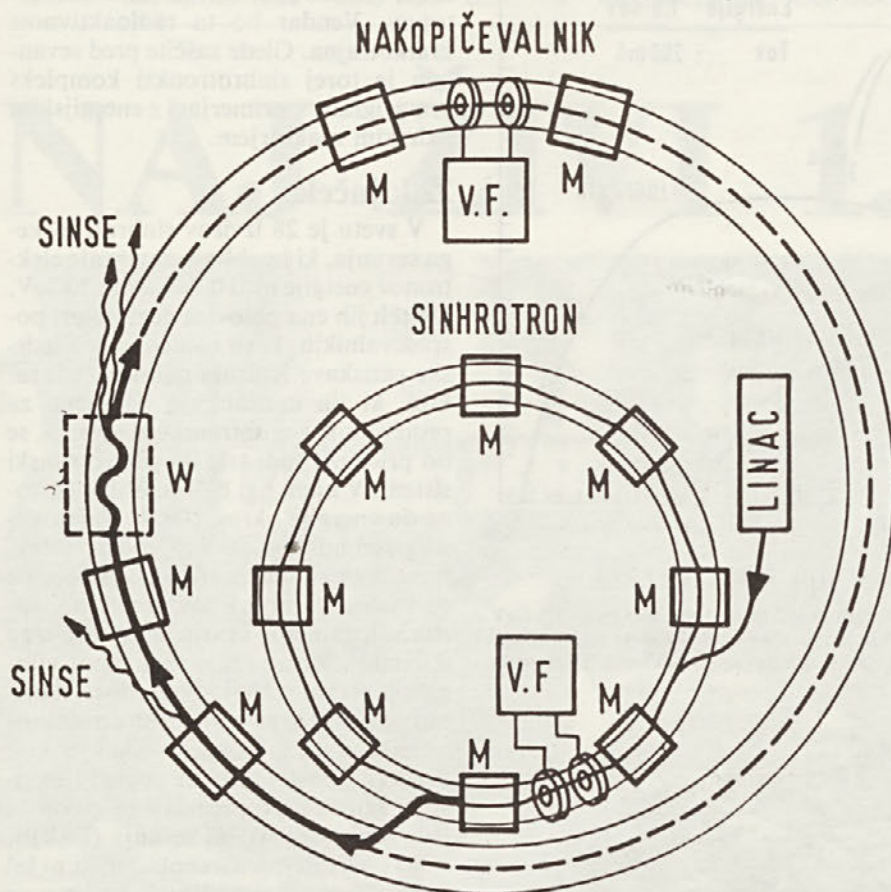
Če je zavojev malo, so pa ostrejši (oster veleslalom), pravimo takemu sistemu magnetov vijugalnik (wiggler). Sistem, v katerem opravi elektron več manjših (slalomskih) zavojev pa imenujemo valovalnik (undulator). Sevanje iz valovalnika je po vzporednosti podobno sevanju iz odklonskega magneta. Sevanje iz vijugalnika je nekoliko bolj razpršeno, vsebuje pa trše žarke X kot sevanje iz ostalih dveh izvirov (sl.8). Da prisilijo elektrone v oster veleslalom, morajo biti magneti vijugalnika izredno močni. Navadni magneti za to ne zadostujejo. Uporabili bodo t.im. superprevodne elektromagnete, pri katerih žične ovoje iz posebne snovi ohladijo s



Sl.3. Ko visokoenergijskim elektronom v magnetem polju spremenimo smer gibanja, sevajo sinhrotronsko svetlobo.



Sl.4. Linearni pospeševalnik (LINAC). Pospeševalne elektrode so povezane z virom visokofrekvenčne izmenične napetosti. Pozitivna napetost elektrone pospeši v prostoru med elektrodami. Ko pa je med elektrodami negativna napetost, ki bi elektrone zavrla, le-ti potujejo znotraj elektrod, kjer ni polja.



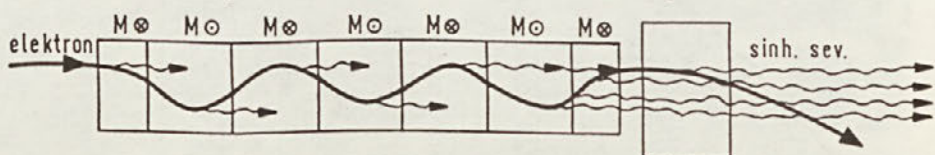
Sl.5. Iz linearnega pospeševalnika usmerijo elektrone v sinhrotron, kjer jih magneti (M) prisilijo v gibanje po celi v obliki svitka. Ob vsakokratnem prehodu pospeševalne celice, ki jo napaja visokofrekvenčna napetost (V.F.), se elektroni dodatno pospešijo. Ko je energija elektronov dovolj visoka, jih preusmerijo v shranjevalni obroč, ki je podoben sinhrotronu, le da v njem vzdržujejo elektrone pri konstantni energiji. Magneti (M - narisanih je le nekaj), ki ukrivljajo poti elektronov v nakopičevalniku, so uporabni izvori sinhrotronkega sevanja. Še boljši izviri tega sevanja so vijugalniki oz. valovalniki (W).

tekočim helijem na temperaturo -269°C . Ker oboji pri tem izgubijo električni upor, t.j. postanejo supraprevodni, lahko po njih tečejo veliki tokovi, ki ustvarijo močna magnetna polja. Ker se valovanja posameznih slalamskih zavojev (na poseben način) seštevajo, lahko razumemo, da je pri valovalnikih gostota energijskega toka sevanja največja. Z izbiro magnetov celo dosežejo, da je svetloba koncentrirana okrog željene valovne dolžine. Valovalniki so lahko sestavljeni celo iz permanentnih magnetov.

Struktura valovalnika je tudi osnova za izdelavo sinhrotronkega laserja (pravijo mu tudi laser na proste elektrone), torej naprave, ki oddaja sinhrotronsko sevanje ene same valovne dolžine v zelo ozkem snopu. Zaenkrat še ne moremo pričakovati lasevjev v območju žarkov X, ampak pri večjih valovnih dolžinah.

Uporaba sinhrotronkega sevanja

Dobro vemo, da uporabljajo rentgensko sevanje za preiskave in obsevanja v medicini in da z njim n.pr. preiskujejo tudi kompaktnost zvarov. Medicinske preiskave n.pr. ožilja srca, med katerimi je potrebno s katetrom uvajati v kri kontrastno sredstvo (angiografija), pacienta močno obremenijo, so pa tudi nevarne. Ko bodo rentgenske žarke zamenjali s sinhrotronkim sevanjem, se bo količina kontrastnega sredstva zmanjšala na komaj omembno vrednost



Sl.7. Valovalnik, oz. vijugalnik sestavlja zaporedje močnih magnetov (M), ki prisilijo elektrone v slalamsko oz. ostro veleslalamsko gibanje. Pri tem elektroni sinhrotronsko sevajo.

(sl.9).

V splošnem je manj znano, da z rentgenskimi žarki že več kot 50 let določajo strukturo kristalov, velikih molekul itd. Vendar morajo biti za to kristali in vzorci primerno veliki, česar pa v mnogih primerih ni lahko doseči. Za majhne vzorce potrebujemo v ozkem curku večjo jakost svetlobe, kot jo dosežemo pri rentgenskih napravah. Sinhrotronsko sevanje odpira na tem področju nešteto novih možnosti.

Včasih bi n.pr. radi zasledovali spreminjanje strukture že med nastajanjem kristala, med prekristalizacijo itd. To pomeni opraviti veliko število zaporednih meritev, katerih vsaka traja n.pr. samo nekaj tisočink sekunde. Za to so potrebni dovolj močni izvori rentgenskega sevanja. Sinhrotronsko sevanje je za take preiskave posebej primerno.

Sinhrotronsko sevanje je nepogrešljivo pri raziskavah z elektromagnetnim valovanjem valovnih dolžin med ultravijolično svetlobo (100 milijonink mm - 100nm) do rentgenskih žarkov (0.1 milijoninke mm - 0.1 nm), saj skoraj ni ustreznih drugih svetil. Izvori v Trstu bodo v glavnem namenjeni raziskavam v tem območju valovnih dolžin.

Naštajmo nekatere konkretne primere uporabe SINSE.

Novi materiali: študij tehnične keramike, stekel, polimerov, polprevodnikov, superprevodnikov, nerjavečih jekel, različnih zlitin, sintetičnih materialov itd.

Kemija: študij katalize, strukture molekul in površin.

Biologija: študij kristalne strukture proteinov v različnih sredinah in zasledovanje njihovih časovnih sprememb.

Medicina: angiografija in določanje zelo majhnih koncentracij svinca, kadmija, arzena in živega srebra v zraku in v vodi.

Izvir sinhrotronkega sevanja in okolje

Sinhrotronsko sevanje, in tega je v sinhrotronem kompleksu največ, za okolje ni nevarno, saj se pred njim zaščitimo že z nekaj mm debelo steno svinca. Več kot zadosti nas ščitijo že navadno debele stene stavb. Bolj prodorni so žarki ali pa nevtroni in mezoni, ki nastanejo, kadar kak elektron n.pr. zaradi slučajnega trka z molekulo zraka pobegne iz curka in se zaleti v steno pospeševalne cevi. Vendar je pri normalnem obratovanju pospeševalnega sistema tega sevanja zelo malo. Veliko več škode bi lahko povzročili tisti nevtroni

in mezoni, ki bi nastali, ko bi se zaradi odpovedi napajanja n.pr. že enega samega magneta celotni curek elektronov zaletel v steno pospeševalne cevi. Zato mora biti zaščita pospeševalnika prera-

čunana za tak poseben primer. Iz objavljenih analiz sledi, da v večini primerov zadostuje zaščita z betonsko ali zemeljsko plastjo (sl.10) debeline od 2m do 3m. Le na nekaterih mestih je potreb-

no dodati še plast svinca debeline 2cm. Glede na to, da bodo n.pr. eksperimentalne dvorane za meritve s sinhrotronskim sevanjem oddaljene od shranjevalnega obroča le 4m, ni bojazni, da bi v daljnji okolici sinhrotrona sevalna doza zaznavno narasla glede na naravno ozadje.

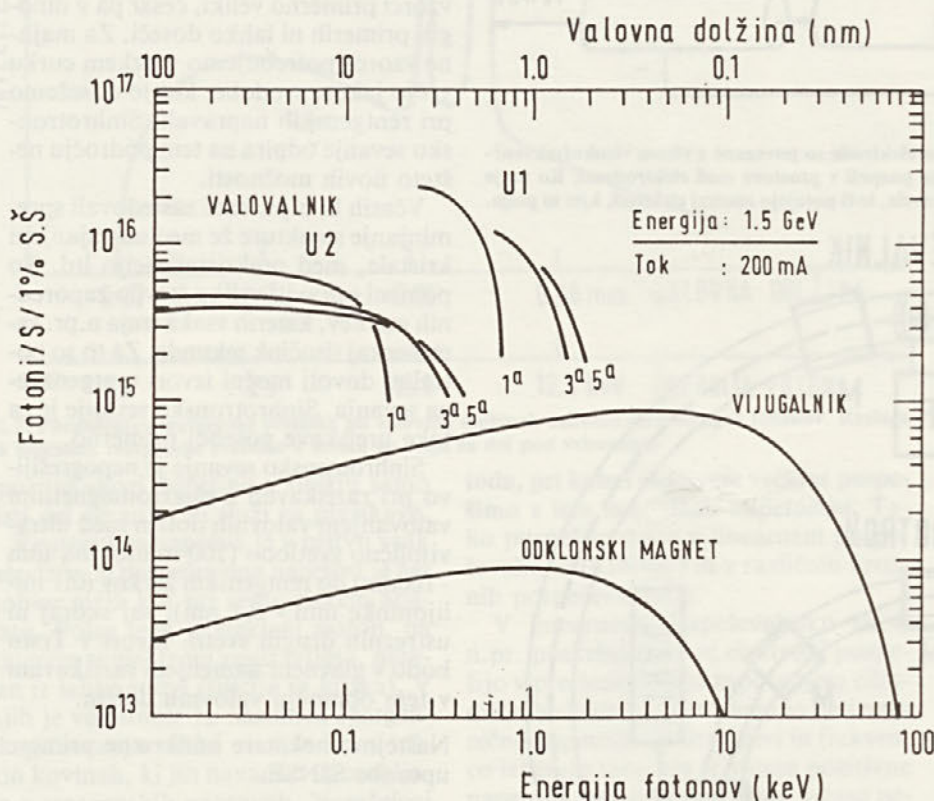
Po prenehanju delovanja pospeševalnika pričakujemo, da bodo pospeševalne cevi nekoliko radioaktivne, saj n.pr. zaletavanje nevtronov v jedra okoliške snovi vodi do umetno radioaktivnih izotopov. Vendar bo ta radioaktivnost kratkotrajna. Glede zaščite pred sevanjem je torej sinhrotronski kompleks prava igrača v primerjavi z energijskim jedrskim reaktorjem.

Zaključek

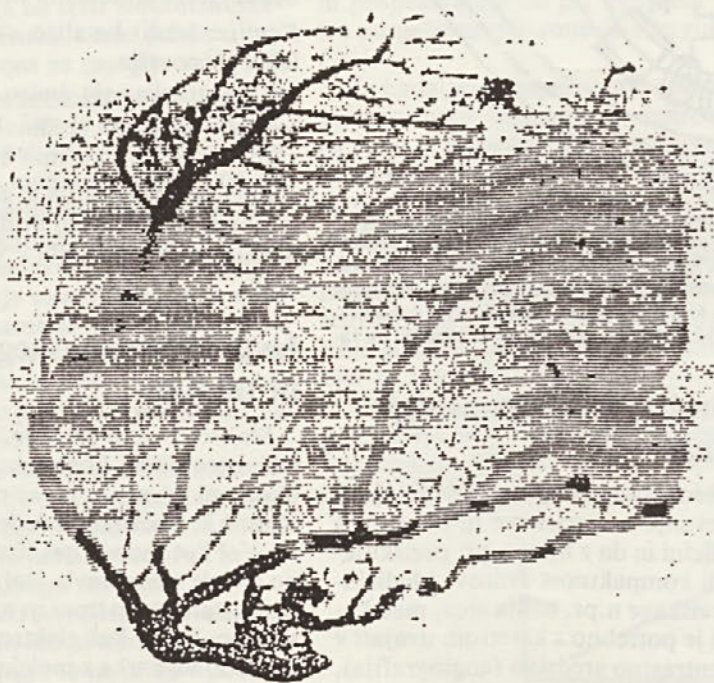
V svetu je 28 izvirov sinhrotronskega sevanja, ki izrabljajo zaviranje elektronov energije med 0.24GeV in 30GeV. Od teh jih ena polovica gostuje pri pospeševalnikih, ki so namenjeni za jedrske raziskave. K drugi polovici, t.j. takim, ki jih uporabljajo izključno za proizvodnjo sinhrotronskega sevanja, se bo pridružil tudi tržaški sinhrotronski sistem. V njem naj bi pospešili elektrone do energije okrog 2GeV. Načrtovana posebnost bo skrbno vodenje elektronskega snopa znotraj pospeševalne cevi tako, da bo njegov presek na mestih valovalnikov in vijugalnikov okrog 0,01mm². Z ustrezno dognanimi vijugalniki in valovalniki bodo dosegli približno 1.000 krat večjo gostoto sinhrotronskega sevanja, kot je bila kjer koli dosežena doslej. V tem pogledu se sistem zgleduje po projektu za evropski izvir sinhrotronskega sevanja (ESRF), ki ga načrtujejo v Grenoblu in ki ni bil usojen Trstu. Ker bo ESRF osnovan na elektronih energije 5GeV, bo torej primeren za raziskve z bolj trdimi žarki X, kot tržaška tovarna svetlobe.

Za izgradnjo celotnega sinhrotronskega kompleksa je predvidena površina 45 ha. Od tega naj bi za pospeševalnike, napajalne naprave, laboratorije, predavalnice, upravne zgradbe, menzo in stavbo za goste zazidali eno tretjino. Ostalo bo park. Za gradnjo načrtujejo 65.000 delovnih dni. Namestitev in priprava naprave bo zahtevala še trikrat toliko delovnega časa. Celotni sistem bo vzdrževalo in izpopolnjevalo 35 fizikov, 15 inženirjev, 6 računalnikarjev, 80 tehnikov in okoli 10 drugih. Celotni sinhrotronski center bodo napajali z močjo 10MW, kar približno ustreza porabi 5.000 električnih štedilnikov.

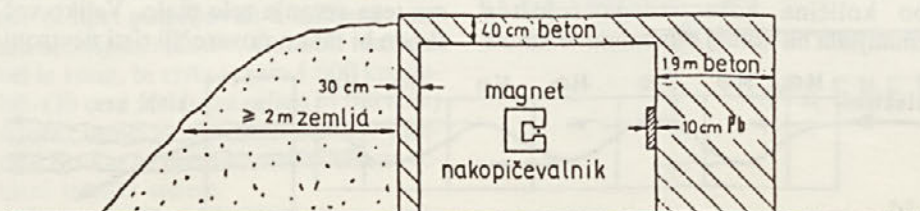
Čeprav bo izgradnjo sinhrotronskega centra v Trstu finansirala v glavnem Italija, je že v naprej predvideno, da bodo v njem gostovali raziskovalci iz vsega sveta. Vsaka skupina naj bi skrbela za svoj raziskovalni kanal pri shranjevalnem obroču. En tak kanal naj bi si, ob podpori italijanske vlade, opremili tudi raziskovalci iz jugoslovanskih univerz in institutov.



Sl.8. Porazdelitev fotonov sinhrotronskega sevanja po energiji za elektronski curek energije 1.5 GeV. Najvišjo energijo dosežejo pri vijugalnikih. Pri valovalnikih je zgornja energijska meja nižja. Vendar je pri valovalnikih približno 100 krat večja gostota sevanja kot pri navadnih odklonskih magnetih.



Sl.9. Slika ožilja prašičjega srca dobljena s sinhrotronskim sevanjem. Pri snemanju je bila koncentracija kontrastnega sredstva le nekaj kapljic na 1 liter krvi.



Sl.10. Shematski prikaz zaščite cevi nakopičevalnika. Zaščita ostalih delov centra sinhrotronskega sevanja bo približno enaka.